

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP2006/300372

International filing date: 13 January 2006 (13.01.2006)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP
Number: 2005-008207
Filing date: 14 January 2005 (14.01.2005)

Date of receipt at the International Bureau: 02 March 2006 (02.03.2006)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2005年 1月14日

出 願 番 号
Application Number: 特願2005-008207

パリ条約による外国への出願
に用いる優先権の主張の基礎
となる出願の国コードと出願
番号

The country code and number
of your priority application,
to be used for filing abroad
under the Paris Convention, is

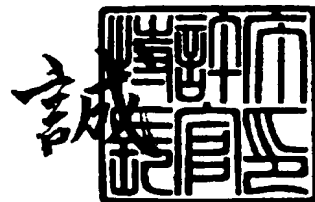
J P 2005-008207

出 願 人
Applicant(s): 日本電信電話株式会社

2006年 2月15日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

中 嶋



【書類名】	特許願
【整理番号】	NTTH166621
【提出日】	平成17年 1月14日
【あて先】	特許庁長官 殿
【国際特許分類】	G02F 1/035 G02F 1/313 G02B 6/122
【発明者】	
【住所又は居所】	東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
【氏名】	井上 靖之
【発明者】	
【住所又は居所】	東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
【氏名】	橋詰 泰彰
【発明者】	
【住所又は居所】	東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
【氏名】	才田 隆志
【発明者】	
【住所又は居所】	東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
【氏名】	杉田 彰夫
【特許出願人】	
【識別番号】	000004226
【氏名又は名称】	日本電信電話株式会社
【代理人】	
【識別番号】	100077481
【弁理士】	
【氏名又は名称】	谷 義一
【選任した代理人】	
【識別番号】	100088915
【弁理士】	
【氏名又は名称】	阿部 和夫
【手数料の表示】	
【予納台帳番号】	013424
【納付金額】	16,000円
【提出物件の目録】	
【物件名】	特許請求の範囲 1
【物件名】	明細書 1
【物件名】	図面 1
【物件名】	要約書 1
【包括委任状番号】	9701393

【書類名】 特許請求の範囲

【請求項 1】

基板上に形成された導波路で構成される導波路型可変光減衰器において、

前記可変光減衰器が、入力導波路、第 1 の光カブラ、第 2 の光カブラ、第 1 の光カブラと第 2 の光カブラを結ぶ 2 本のアーム導波路、および出力導波路から構成されており、該第 1 と第 2 の光カブラは前記 2 本のアーム導波路を近接して構成される方向性結合器であって、且つ、

前記第 1、第 2 の光カブラにおける偏波モード結合が -25 dB 以下であることを特徴とする導波路型可変光減衰器。

【請求項 2】

前記アーム導波路の長さが、使用光波長を導波路複屈折で割って求められるビート長の整数倍に設計されていることを特徴とする請求項 1 に記載の導波路型可変光減衰器。

【請求項 3】

基板上に形成された導波路で構成される導波路型可変光減衰器において、

前記可変光減衰器が、入力導波路、第 1 の光カブラ、第 2 の光カブラ、第 1 の光カブラと第 2 の光カブラを結ぶ 2 本のアーム導波路、および出力導波路から構成されており、該第 1 と第 2 の光カブラは前記 2 本のアーム導波路を近接して構成される方向性結合器であって、且つ、

前記アーム導波路の長さが、使用光波長を導波路複屈折で割って求められるビート長の整数倍に設計されていることを特徴とする導波路型可変光減衰器。

【請求項 4】

前記第 1、第 2 の光カブラを構成する該光カブラ部分での導波路の複屈折率の絶対値が 3.5×10^{-4} 以上であることを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれかに記載の導波路型可変光減衰器。

【請求項 5】

前記 2 本のアーム導波路の少なくとも一方に位相制御器を具備しており、可変光減衰器もしくは光スイッチとして機能することを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれかに記載の導波路型可変光減衰器。

【請求項 6】

前記基板がシリコン基板であり、前記導波路が石英系ガラス導波路であることを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれかに記載の導波路型可変光減衰器。

【書類名】明細書

【発明の名称】導波路型可変光減衰器

【技術分野】

【0001】

本発明は、基板上の光導波路で構成された導波路型可変光減衰器に関する。更に詳しくは、本発明は、その構成要素である光カブラにおける導波路複屈折を一定の値以上に設定して偏波モード結合を抑制するか、もしくはアーム導波路の長さを複屈折ビート長の整数倍に設定することにより、偏波依存性を抑制した偏波無依存導波路型可変光減衰器に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、通信容量の拡大のために複数の光波長を用いた光波長多重通信システム(WDMシステム)の開発が盛んである。光波長多重通信システムでは、非線形抑圧やクロストーク抑圧の観点から、各波長信号のレベルを等しくすることが求められる。現在、このレベル等化のために導波路型可変光減衰器アレイが広く用いられようとしている。導波路型可変光減衰器はアレイ化などの集積化が容易であるため、経済化や小型化の観点で、それ以外のバルク型・磁気光学型・MEMS型可変光減衰器よりも有利である。

【0003】

図面を用いて導波路型可変光減衰器の説明を行う。図8に従来の代表的な導波路型可変光減衰器の平面図を示す。この導波路型可変光減衰器100は、入力導波路101a、101b、第1の光カブラ102、2本のアーム導波路103、104、それらアーム導波路上に配置された位相制御器105、第2の光カブラ106、出力導波路107a、107b、および薄膜ヒータ108を有する。110は後述する応力解放溝である。

【0004】

図9は上記の応力解放溝110が形成されていない従来例を想定した場合の図8のa-a'切断線に沿う拡大断面図である。図9に示すように、導波路型可変光減衰器100の基板は熱伝導性に優れたシリコン基板109が使われ、埋め込まれた石英系導波路103、104の表面に薄膜ヒータ108が配置された構成となっている。

【0005】

その導波路型可変光減衰器100の動作原理を以下に簡単に説明する。入力導波路101aから入射された光は、第1の光カブラ102で2分岐されて2本のアーム導波路103、104に分かれる。位相制御器105を具備したアーム導波路103、104を伝搬した光は、再度第2の光カブラ106で干渉して、互いの位相が一致している場合にはクロスポート出力導波路107aに、互いの位相が π ずれている場合には、スルーポート出力導波路107bに、その中間の状態の場合には、両方の出力導波路107a、107bから互いの位相差に応じて光が出力される。第2の光カブラ106に入射するときの2つの光の位相関係は、アーム導波路104に設けた位相制御器105で制御される。位相制御器105としては、石英系導波路103、104上に配置された薄膜ヒータ108による熱光学位相制御器がよく用いられる。熱光学効果は原理的には偏波依存性のない現象であるため、電気光学効果や光弾性効果に比べて、偏波依存性が少ないという特徴を有している。

【0006】

上述のとおり、熱光学効果を用いた従来の導波路型可変光減衰器は、アレイ化など集積化が容易であるため、電気光学効果や光弾性効果などの他技術を用いた可変光減衰器に比べて経済化・小型化の観点から有利である。

【0007】

【非特許文献1】Y. Inoue et al., "Polarization sensitivity of a silica waveguide thermo-optic phase shifter for planar lightwave circuits," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 1, pp. 36-38, Jan. 1992.

【非特許文献2】KIM et al., "Limitation of PMD Compensation Due to Polarizati

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、実際には、熱光学効果を用いた従来の導波路型可変光減衰器には、可変光減衰器の減衰量を増やしたときに偏波依存性 (polarization dependent loss : PDL) が大きくなるという点があった。図9の断面構造を有する可変光減衰器の光減衰量とPDLとの関係を図10に示す。図10に示すように、15 dBの光減衰量において4 dB近くの大きなPDLが発生している。光減衰時のPDLが大きいということは、光ファイバ中の偏波状態を規定しない現行の光通信システム運用上極めて大きな問題であり、これが導波路型可変光減衰器の普及を妨げている最大の原因であった。

【0009】

このように、従来の導波路型可変光減衰器は可変光減衰器の光減衰量を増やしたときに偏波依存性が大きいという解決すべき点があった。

【0010】

本発明の目的は、導波路型可変光減衰器の偏波依存性の問題を解消し、偏波依存性の小さな導波路型可変光減衰器を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0011】

上記目的を達成するため、本発明の第1の態様は、基板上に形成された導波路で構成される導波路型可変光減衰器において、前記可変光減衰器が、入力導波路、第1の光カブラ、第2の光カブラ、第1の光カブラと第2の光カブラを結ぶ2本のアーム導波路、および出力導波路から構成されており、該第1と第2の光カブラは前記2本のアーム導波路を近接して構成される方向性結合器であって、且つ、前記第1、第2の光カブラにおける偏波モード結合が-25 dB以下であることを特徴とする。

【0012】

ここで、前記アーム導波路の長さが、使用光波長を導波路複屈折で割って求められるビート長の整数倍に設計されていることを特徴とすることができる。

【0013】

また、本発明の第2の態様として、基板上に形成された導波路で構成される導波路型可変光減衰器において、前記可変光減衰器が、入力導波路、第1の光カブラ、第2の光カブラ、第1の光カブラと第2の光カブラを結ぶ2本のアーム導波路、および出力導波路から構成されており、該第1と第2の光カブラは前記2本のアーム導波路を近接して構成される方向性結合器であって、且つ、前記アーム導波路の長さが、使用光波長を導波路複屈折で割って求められるビート長の整数倍に設計されていることを特徴とする、とすることができる。

【0014】

さらに、前記第1、第2の光カブラを構成する該光カブラ部分での導波路の複屈折率の絶対値が 3.5×10^{-4} 以上であることを特徴とすることができる。

【0015】

また、好ましくは、前記2本のアーム導波路の少なくとも一方に位相制御器を具備しており、可変光減衰器もしくは光スイッチとして機能するとすることができる。

【0016】

また、好ましくは、前記基板がシリコン基板であり、前記導波路が石英系ガラス導波路であることができる。

【発明の効果】

【0017】

上記構成により、本発明によれば、光減衰時のPDL (偏波依存性) が小さな導波路型可変光減衰器、光スイッチ、光フィルタを実現することが可能となる。この結果として、

本発明によれば、小型で集積性に優れた導波路型可変光減衰器、光スイッチ、光フィルタが実用的になり、光波長多重通信システムの通信装置等の経済化等に寄与する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

（偏波依存性発生モデルと偏波依存性を抑圧するための必要条件）

具体的な本発明の実施形態の説明に入る前に、導波路型可変光減衰器の偏波依存性の原因を解析した結果を述べる。

【0019】

石英系ガラス中の熱光学効果は基本的に偏波依存性を有しない現象であることは従来技術に述べた。では何故、導波路型可変光減衰器が偏波依存性を有するかを、図8、図9を用いて以下に説明する。偏波依存性の主たる原因としては2つ考えられる。1つは、熱光学位相制御器105の偏波依存性であり、もう1つは光カブラ102、106における偏波モード結合である。

【0020】

まず、前者の熱光学位相制御器105の偏波依存性については、非特許文献1に報告されている。その報告内容を簡単に説明すると、薄膜ヒータ108で局所的に加熱された石英系導波路103、104は膨張しようとする。その場合、基板109と垂直な方向（図9の上方向）へは膨張することができるが、基板109と平行方向（図9の横方向）へは周囲が加熱されない石英系ガラス（クラッド）111で囲まれているため、膨張することができない。この結果として、基板109と平行方向に強い圧縮応力が発生する。この圧縮応力は光弾性効果として導波路（コア）103、104の屈折率を増加させる。従って、薄膜ヒータ108の直下の導波路103、104は、温度上昇に伴う熱光学効果とともに、局所的なガラスの熱膨張に起因する光弾性効果により屈折率が増加する。このため、熱光学効果自体には偏波依存性がないものの、熱膨張で生じる応力に異方性があるため、光弾性効果による屈折率変化が偏波依存性を有することとなる。

【0021】

この光弾性効果による熱光学位相制御器の偏波依存性は、図11に示すように、熱光学位相制御器105（並びに薄膜ヒータ108）の両側に応力解放溝110を形成することで、ある程度抑制できる。図11の応力解放溝110を形成した可変光減衰器の光減衰量とPDLとの関係を図12に示す。図9の断面構造の可変光減衰器では15 dB減衰時のPDLが3.8 dBであったものが（図10を参照）、図11の応力解放溝付き可変光減衰器では1.7 dBと、PDLが半分以上の値に低減できている。しかしながら、15 dB減衰時のPDLが1.7 dBという値は、現行の光通信システムの運用上十分な値ではなく、更なるPDLの抑圧が必要であった。本発明では、15 dB減衰時のPDLが、実際に現行の光通信システムの運用上必要な値と要求されている、0.5 dB以下となることを目標とした（非特許文献2）。

【0022】

薄膜ヒータ108の両側に配置した図11の応力解放溝110は、断熱溝として薄膜ヒータ108で生じた熱が導波路以外の領域を加熱するのを抑制しており、熱光学位相制御器の低消費電力化にも有効である。

【0023】

次に、光カブラの偏波モード結合による偏波依存性について説明する。ここでは、光カブラとして、図8に示すような、2本の導波路を近接して構成される方向性結合器102、106を想定する。一般に、平面基板上の導波路は擾乱が無い限り、偏波モード間の結合は生じない。しかし、方向性結合器部ではコアが近接するため、コアの埋め込み時にその2つのコアがお互いに近づく方向に力を受ける。具体的には、火炎堆積法を用いて上部クラッドを形成する場合に、ガラス微粒子をコアの上に体積後、透明化熱処理の過程でガラス微粒子が溶けて収縮しながら、コアを覆う。2つのコアに挟まれた領域ではガラス微粒子の供給が不足するため、ガラスが粗になり、2つのコアは両側から内側に押される。この圧力が導波路の光学主軸を傾けて、方向性結合器で結合したクロスポート光の一部が

偏波モード結合を起こす。一方、2つのコアが離れるに従い、光学主軸は元通り上下左右に戻るため、スルーポート光は偏波結合を生じない。この場合、第1の入力導波路（入力ポート）101aから第1のアーム導波路103を経て第1の出力導波路（出力ポート）107aに伝搬する光は次式（1）に、第1の入力導波路101aから第2のアーム導波路104を経て第1の出力導波路107aに伝搬する光は次式（2）に、第1の入力導波路101aから第1のアーム導波路103を経て第2の出力導波路107bに伝搬する光は次式（3）に、第1の入力導波路101aから第2のアーム導波路104を経て第2の出力導波路107bに伝搬する光は次式（4）に、それぞれ書き表される。

【0024】

但し、次式行列の第1行はTE成分を、第2行はTM成分を示す。またI TE（TM）：入力光のTE（TM）成分、 κ ：光カブラの結合効率、 α ：光カブラにおける光学主軸の傾き、 θ_1 （2）TE（TM）：第1（2）のアーム導波路103，104における位相変化量と定義する。ここで、光カブラにおけるクロスポート偏波結合量は $\sin 2\alpha$ で表される。

【0025】

【数1】

$$\begin{aligned}
 I_1 \rightarrow \mathcal{T} - h_1 \rightarrow 0_1 \\
 \begin{pmatrix} \cos \alpha & -j \cdot \sin \alpha \\ -j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \sqrt{1 - \kappa^2} \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\theta_{1TE}} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{1TM}} \end{pmatrix} \\
 \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & -j \cdot \sin \alpha \\ -j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \sqrt{1 - \kappa^2} \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{TE} \\ I_{TM} \end{pmatrix} \quad (1) \\
 = (1 - \kappa^2) \begin{pmatrix} I_{TE} e^{j\theta_{1TE}} \\ I_{TM} e^{j\theta_{1TM}} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

【0026】

【数2】

$$\begin{aligned}
 I_1 \rightarrow \mathcal{T} - h_2 \rightarrow 0_1 \\
 \begin{pmatrix} \cos \alpha & -j \cdot \sin \alpha \\ -j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} j\kappa \begin{pmatrix} \cos \alpha & -j \cdot \sin \alpha \\ -j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\theta_{2TE}} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{2TM}} \end{pmatrix} \\
 \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} j\kappa \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{TE} \\ I_{TM} \end{pmatrix} \\
 = -\kappa^2 \begin{pmatrix} I_{TE} (e^{j\theta_{2TE}} \cos^2 2\alpha + e^{j\theta_{2TM}} \sin^2 2\alpha) + jI_{TM} (e^{j\theta_{2TE}} - e^{j\theta_{2TM}}) \sin 2\alpha \cos 2\alpha \\ jI_{TE} (-e^{j\theta_{2TE}} + e^{j\theta_{2TM}}) \sin 2\alpha \cos 2\alpha + I_{TM} (e^{j\theta_{2TE}} \sin^2 2\alpha + e^{j\theta_{2TM}} \cos^2 2\alpha) \end{pmatrix} \\
 (2) \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 7 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

【数3】

$$\begin{aligned}
 I_1 \rightarrow \mathcal{T} - h_1 \rightarrow 0_2 \\
 \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} j\kappa \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\theta_{1TE}} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{1TM}} \end{pmatrix} \\
 \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & -j \cdot \sin \alpha \\ -j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \sqrt{1 - \kappa^2} \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{TE} \\ I_{TM} \end{pmatrix} \quad (3) \\
 = j\kappa \sqrt{1 - \kappa^2} \begin{pmatrix} I_{TE} e^{j\theta_{1TE}} \cos 2\alpha + jI_{TM} e^{j\theta_{1TM}} \sin 2\alpha \\ jI_{TE} e^{j\theta_{1TE}} \sin 2\alpha + I_{TM} e^{j\theta_{1TM}} \cos 2\alpha \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

【0028】

【数 4】

$I_1 \rightarrow \gamma - \Delta_2 \rightarrow 0_2$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -j \cdot \sin \alpha \\ -j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \sqrt{1 - \kappa^2} \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\theta_{2TE}} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{2TM}} \end{pmatrix} \\ \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} j\kappa \begin{pmatrix} \cos \alpha & j \cdot \sin \alpha \\ j \cdot \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{TE} \\ I_{TM} \end{pmatrix} \quad (4) \\ = j\kappa \sqrt{1 - \kappa^2} \begin{pmatrix} I_{TE} e^{j\theta_{2TE}} \cos 2\alpha + jI_{TM} e^{j\theta_{2TE}} \sin 2\alpha \\ jI_{TE} e^{j\theta_{2TM}} \sin 2\alpha + I_{TM} e^{j\theta_{2TM}} \cos 2\alpha \end{pmatrix}$$

【0 0 2 9】

第1の入力導波路1 0 1 aから第1の出力導波路1 0 7 aへのスルーポート出力は上式(1)と上式(2)の和をとって次式(5)となる。

【0 0 3 0】

【数 5】

$I_1 \rightarrow 0_1$

$$\begin{pmatrix} I_{TE} \{ (1 - \kappa^2) e^{j\theta_{1TE}} - \kappa^2 (e^{j\theta_{2TE}} \cos^2 2\alpha + e^{j\theta_{2TM}} \sin^2 2\alpha) \} - jI_{TM} \kappa^2 (e^{j\theta_{2TE}} - e^{j\theta_{2TM}}) \sin 2\alpha \cos 2\alpha \\ - jI_{TE} \kappa^2 (-e^{j\theta_{2TE}} + e^{j\theta_{2TM}}) \sin 2\alpha \cos 2\alpha + I_{TM} \{ (1 - \kappa^2) e^{j\theta_{1TM}} - \kappa^2 (e^{j\theta_{2TE}} \sin^2 2\alpha + e^{j\theta_{2TM}} \cos^2 2\alpha) \} \end{pmatrix} \quad (5)$$

【0 0 3 1】

上式(5)において、見通しをよくするために光カブラの結合率として次式(6)を仮定する。

【0 0 3 2】

【数 6】

$$\kappa^2 = \frac{1}{2} \quad (6)$$

【0 0 3 3】

スルーポート出力が最も減衰する条件は、2本のアーム導波路長が等しい条件として次式(7)で表される。

【0 0 3 4】

【数 7】

$$e^{j\theta_{1TE}} = e^{j\theta_{2TE}}, e^{j\theta_{1TM}} = e^{j\theta_{2TM}} \quad (7)$$

【0 0 3 5】

上式(5)に上式(6)上式(7)を代入したとき、偏光状態に依存せずに常に上式(5) = 0 が成り立つための条件を求める。これが偏波無依存条件となる。ここで偏光状態に依存しないとは I TE と I TM の強度比および位相差に依存しないという意味である。

【0 0 3 6】

【数 8】

$$\frac{(e^{j\theta_{1TE}} - e^{j\theta_{1TM}}) \sin 2\alpha}{2} \begin{pmatrix} I_{TE} \sin 2\alpha - jI_{TM} \cos 2\alpha \\ jI_{TE} \cos 2\alpha - I_{TM} \sin 2\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

【0 0 3 7】

上式(8)から偏波無依存条件として次式(9)が導出される。但し m は整数。

【0 0 3 8】

【数 9】

$$\sin 2\alpha = 0$$

or

(9)

$$\theta_{1TE} - \theta_{1TM} = 2m\pi$$

【0 0 3 9】

ここで、第1のアーム導波路103における、アーム導波路の長さを L 、使用波長を λ 、TM光の実効屈折率を n_{1TM} 、TE光の実効屈折率を n_{1TE} 、導波路複屈折を B と
おくと、次式(10)、(11)、(12)のように定義される。

【0 0 4 0】

【数10】

$$\theta_{1TE} = 2\pi \frac{n_{1TE} L}{\lambda} \quad (10)$$

【0 0 4 1】

【数11】

$$\theta_{1TM} = 2\pi \frac{n_{1TM} L}{\lambda} \quad (11)$$

【0 0 4 2】

$$B = n_{1TM} - n_{1TE} \quad (12)$$

これら式(10)、(11)を上記式(9)の下段の式(第2式と称する)に代入し、
式(12)を適用すると、次式(13)が得られる。

【0 0 4 3】

【数12】

$$L = -m \frac{\lambda}{B} \quad (13)$$

【0 0 4 4】

すなわち、上記式(9)、(13)から、光カブラにおける偏波結合($\sin 2\alpha$)
が0になるか、もしくはアーム導波路の長さ(L)が使用光波長(λ)を導波路複屈折(B)
で割って求められるビート長の整数倍(m)であればスルーポート出力の偏波依存性
は解消される。

【0 0 4 5】

同様に、第1の入力導波路101aから第2の出力導波路107bへのクロスポート出
力は上式(3)と上式(4)の和をとって次式(14)となる。

【0 0 4 6】

【数13】

$$I_1 \rightarrow O_2$$

$$jk\sqrt{1-\kappa^2} \left(I_{TE}(e^{j\theta_{1TE}} + e^{j\theta_{2TE}}) \cos 2\alpha + jI_{TM}(e^{j\theta_{1TM}} + e^{j\theta_{2TE}}) \sin 2\alpha \right. \\ \left. + jI_{TE}(e^{j\theta_{1TE}} + e^{j\theta_{2TM}}) \sin 2\alpha + I_{TM}(e^{j\theta_{1TM}} + e^{j\theta_{2TM}}) \cos 2\alpha \right) \quad (14)$$

【0 0 4 7】

クロスポート出力が最も減衰する条件は、2本のアーム導波路長差が使用光波長の $1/2$
波長の場合である。この条件は次式(15)で表される。

【0 0 4 8】

【数14】

$$e^{j\theta_{1TE}} + e^{j\theta_{2TE}} = e^{j\theta_{1TM}} + e^{j\theta_{2TM}} = 0 \quad (15)$$

【0 0 4 9】

上式(14)に上式(15)を代入したとき、偏光状態に依存せずに常に上式(14)
= 0 が成り立つための条件を求める。これが偏波無依存条件となる。

【0050】

【数15】

$$- \kappa \sqrt{1 - \kappa^2} \sin 2\alpha \begin{pmatrix} I_{TM}(e^{j\theta_{1TM}} - e^{j\theta_{1TE}}) \\ I_{TE}(e^{j\theta_{1TE}} - e^{j\theta_{1TM}}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

【0051】

上式(16)から偏波無依存条件として次式(17)が導出される。

【0052】

【数16】

$$\sin 2\alpha = 0$$

or

(17)

$$\theta_{1TE} - \theta_{1TM} = 2m\pi$$

【0053】

上式(17)と上式(9)は等しい。したがって、上式(17)から上式(13)も得られる。すなわち、光カブラにおける偏波結合($\sin 2\alpha$)が0になるか、もしくはアーム導波路の長さ(L)が使用光波長(λ)を導波路複屈折(B)で割って求められるビート長の整数倍(m)であればスルーポート出力およびクロスポート出力の偏波依存性は解消される。

【0054】

以上の考察により、導波路型可変光減衰器および光スイッチの偏波依存性を抑圧するための必要条件が求められる。

【0055】

以下、図面を参照して、本発明の実施の形態を詳細に説明する。

【第1の実施形態】

図1に、本発明の第1の実施形態である導波路型可変光源減衰器の構成を示す。この導波路型可変光減衰器100は、入力導波路101a、第1の光カブラ102、2本のアーム導波路103、104、それらアーム導波路上に配置された位相制御器105、第2の光カブラ106、出力導波路107b、薄膜ヒータ108、および応力解放溝110を有する。本実施形態では、入力導波路101aに対してクロスポートに位置する導波路107bを出力導波路として用いる。クロスポート出力を用いる理由は、第1および第2の光カブラ102、106としての方向結合器を同一設計とした場合に、両者の結合率はほぼ等しくなり、その結果として、可変光減衰量を高く取ることができるためである。

【0056】

図2に図1のa-a'切断線に沿う拡大断面図を示す。基本的な回路構成は従来技術に述べた図11の構成と同じである。本実施形態と従来技術との相違点は、第1および第2の光カブラを構成する方向結合器102、106の導波路複屈折率(絶対値)を 3.5×10^{-4} 以上に設定していることである。ここで、導波路複屈折BはTMモードの実効屈折率 n_{TM} とTEモードの実効屈折率 n_{TE} との差($B = n_{TM} - n_{TE}$)である、と定義する。

【0057】

本実施形態の導波路作製工程を、図3の工程図を用いて簡単に説明する。シリコン基板109上に、火炎体積法(FHD)で SiO_2 を主体にした下部クラッドガラス微粒子301、 SiO_2 に GeO_2 を添加したコアガラス微粒子302を堆積する(図3の(A))。この段階では、ガラス微粒子301、302は光を散乱するため白い膜に見える。

【0058】

その後、1,000℃以上の高温でガラスの透明化を行なう。ガラス微粒子301、3

02を表面に堆積したシリコン基板109を徐々に加熱していくと、ガラス微粒子が溶けて透明なガラス膜が形成される。この時に、下部クラッドガラス層303は $30\mu\text{m}$ 厚、コアガラス層304は $7\mu\text{m}$ 厚となるように、ガラス微粒子の堆積量の調整を行なっている(図3の(B))。

【0059】

引き続き、フォトリソグラフィ技術と反応性イオンエッチング(RIE)によって、コアガラス層304のパターン化を行なう。これにより、下部クラッドガラス層303上にコア305が形成される(図3の(C))。

【0060】

SiO_2 上部クラッドガラス微粒子306を、火炎堆積法(FHD)により、下部クラッドガラス層303を覆ってコア305の上部に堆積する(図3の(D))。

【0061】

最後に高温透明化を行ない、透明な上部クラッドガラス層307が形成された埋め込み導波路を作製する(図3の(E))。上部クラッドガラス層307にはドーパントを添加することでガラス転移温度を下げ、最後の高温透明化の工程でコア305が変形しないようにしている。なお、図3の(E)に示す上部クラッドガラス層(以下、上部クラッド層と称する)307と下部クラッドガラス層(以下、下部クラッド層と称する)303が図2のクラッド111に対応し、コア305が図2の導波路(コア)103、104に対応している。

【0062】

導波路複屈折は、コア305の縦横比や、基板109、コアガラス305、クラッドガラス303、307等の熱膨張係数、軟化温度に依存する。

【0063】

導波路型可変光減衰器を作製するために、図3で説明した工程に加えて、上部クラッド層307の表面への図1、図2の薄膜ヒータ108および配線電極の形成、更に図1の熱光学位相制御器105で発生する熱応力による偏波依存性を抑制するための図1、図2の応力解放溝110の形成を行なう。

【0064】

本発明の実施形態の具体例を説明する前にはじめに論じた偏波依存性発生モデルを実証するために、まず方向性結合器部での偏波結合を評価した。また、その偏波結合量が導波路複屈折に依存するのではないかという推察のもとで、それら両者の相関関係を求めた。方向性結合器部での偏波結合量と導波路複屈折の関係を図4に示す。ここで、横軸は導波路複屈折を、縦軸は方向性結合器1段を透過した後のクロスポート出力における偏波結合量を示す。図4から、クロスポート出力における偏波結合量は導波路複屈折に強い相関があることが分かる。この現象は、「モード結合量は結合を起こす2モード(ここでは2つの偏波モード)間の伝搬定数差(導波路複屈折)に反比例するため」であると解釈できる。また、図4において、同一の導波路複屈折に対して偏波結合量がある程度ばらついているのは、偏波結合自体が様々な攪乱により大きく変動するためと解釈できる。

【0065】

光カプラ102、106における偏波結合量 $|\sin 2\alpha|$ を -25dB 以下とすれば、上式(16)の左辺の値は最大でも入力レベルに対して -25dB 以下となる。すなわち、光減衰量 15dB でのPDLを 0.5dB (10%)以下に抑圧できる。

【0066】

図4によると、導波路複屈折の絶対値を 3.5×10^{-4} 以上に設定することで、偏波結合量 $<-25\text{dB}$ が実現される。すなわち、光減衰量 15dB でのPDLを 0.5dB (10%)以下に抑圧できる。よって、本実施形態の特徴を、第1および第2の光カプラ102、106を構成する方向性結合器の導波路複屈折率(絶対値)を 3.5×10^{-4} 以上に設定していることと定義した。

【0067】

図5に、本発明の第1の実施形態として実際に作製した導波路型可変光減衰器の減衰量

とPDLとの相関関係を示す。本実施形態では、後述の第3の実施形態との比較のために敢えてアーム導波路長をビート長の整数倍の条件から最も離れている約2.5倍の11mmとした。

【0068】

実際に作製した導波路の複屈折は、別途セナルモン（Senarmont）測定系で求めたところ 3.5×10^{-4} であった。このとき、図5に示すように、15dB減衰時のPDLは0.4dBと、当初目標とした0.5dB以下を実現した。

【0069】

本実施形態では、図1、図2を導波路型可変光減衰器として説明を行っているが、第2の光カプラ106に入射するときの2つの光の位相差を0もしくは π の2値で使用することで、図1に示すデバイスは光スイッチとしても利用できる。これと同様に、以下に述べる本発明の他の実施形態も光スイッチとしても利用できる。

【0070】

【第2の実施形態】

本発明の第2の実施形態は、上述の本発明の第1の実施形態と同じく、入力導波路に対して、クロスポート出力を出力導波路として用いる可変光減衰器であり、その基本構成は図1および図2と同じである。第1の実施形態と第2の実施形態の相違点は、第1の実施形態の特徴が、「第1および第2の光カプラを構成する方向性結合器の導波路複屈折率（絶対値）を 3.5×10^{-4} 以上に設定したこと」であったのに対して、第2の実施形態の特徴は、「アーム導波路の長さを、使用光波長を導波路複屈折で割って求められるビート長の整数倍に設定していること」である。

【0071】

第2の実施形態では、上式（17）の第2式の偏波依存条件に相当する。しかし、実際には導波路複屈折率は製作誤差を有するため、完全に上式（17）の第2式を満足することはできない。

【0072】

本実施形態で作製した導波路の複屈折は、 1.2×10^{-4} であった。この場合、導波路複屈折で使用光波長1.55ミクロンの偏波が一回転するビート長は12.9mmと計算される。そこで、本実施形態では、アーム導波路104の長さをビート長に相当する12.9mmと設計した。

【0073】

図6に、上記設計条件を適用して実際に作製した本実施形態の導波路型可変光減衰器の減衰量とPDLとの相関関係を示す。図6から、15dB減衰時のPDLが0.9dBと、従来例に比較すると小さな値に抑制できたことが分かる。

【0074】

【第3の実施形態】

本発明の第3の実施形態も、上述の本発明の第1と第2の実施形態と同じく、入力導波路101aに対して、クロスポート出力107aを出力導波路として用いる可変光減衰器である。その基本構成は図1および図2と同じである。第3の実施形態の特徴は、第1の実施形態の特徴である「第1および第2の光カプラを構成する方向性結合器の導波路複屈折率（絶対値）を 3.5×10^{-4} 以上に設定したこと」と第2の実施形態の特徴である「アーム導波路の長さを、使用光波長を導波路複屈折で割って求められるビート長の整数倍に設定していること」の両方を兼ね備えていることである。

【0075】

実際に作製した導波路の複屈折は、 3.5×10^{-4} であった。アーム導波路の長さはビート長の3倍である13.3mmに設定した。

【0076】

図7に、実際に作製した第3の実施形態の導波路型可変光減衰器の減衰量とPDLとの相関関係を示す。15dB減衰時のPDLは0.2dB、更に25dB減衰時でもPDLは0.6dBと極めて小さい値に抑制できていることが分かる。このように、「第1およ

び第2の光カブラを構成する方向性結合器の導波路複屈折率（絶対値）を 3.5×10^{-4} 以上に設定すること」と「アーム導波路の長さを、使用光波長を導波路複屈折で割って求められるビート長の整数倍に設定すること」は独立に設計できることなので、好ましくは両者を同時に満足するよう可変光減衰器を作製することが好ましい。

【0077】

【その他の実施形態】

上記では、本発明の好適な実施形態を例示して説明したが、本発明の実施形態は上記例示に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載の範囲内であれば、その構成部材等の置換、変更、追加、個数の増減、形状の設計変更等の各種変形は、全て本発明の実施形態に含まれる。

【0078】

例えば、上述の本発明の各実施形態では、作製法として火炎体積法を想定しているが、埋め込み導波路の作製法としては火炎体積法以外にもCVD法（化学気相積層法）、VPE法（化学的気相析出法）などの気相成長法や、スパッタ法などの気相堆積法もあり、それら作製法を適用した場合においても本発明は有効である。

【0079】

また、上述の本発明の各実施形態では、光カブラとして方向性結合器を想定しているが、クロスポートで偏波結合を生じる光カブラに対してはその形状に依存せずに有効である。

【0080】

また、上述の本発明の各実施形態では、シリコン基板上に形成した石英系ガラス導波路を用いた光干渉計を示したが、その導波路材料がガラス以外の例えばポリイミド、シリコン、半導体、 LiNbO_3 などであっても本発明の上記の原理は適用可能である。また、基板の材質もシリコンに限定するものではない。

【図面の簡単な説明】

【0081】

【図1】本発明の第1の実施形態の導波路型可変光減衰器の構成を示す平面図である。

【図2】本発明の第1の実施形態の導波路型可変光減衰器の断面構造を拡大して示す断面拡大図である。

【図3】本発明の第1の実施形態の導波路型可変光減衰器の導波路作製工程を示す工程図である。

【図4】導波路複屈折と方向性結合器クロスポートにおける偏波結合量の関係を示す特性図である。

【図5】本発明の第1の実施形態の導波路型可変光減衰器における光減衰量と偏波依存損失（PDL）との関係を示す特性図である。

【図6】本発明の第2の実施形態の可変光減衰器における光減衰量と偏波依存損失（PDL）との関係を示す特性図である。

【図7】本発明の第3の実施形態の導波路型可変光減衰器における光減衰量と偏波依存損失（PDL）との関係を示す特性図である。

【図8】従来技術による導波路型可変光減衰器の構成を示す平面図である。

【図9】従来技術による導波路型可変光減衰器の断面構造を拡大して示す断面拡大図である。

【図10】従来技術の導波路型可変光減衰器における光減衰量と偏波依存損失（PDL）との関係を示す特性図である。

【図11】従来技術による応力解放溝付き導波路型可変光減衰器の断面構造を拡大して示す断面拡大図である。

【図12】従来技術の応力解放溝付き可変光減衰器における光減衰量と偏波依存損失（PDL）との関係を示す特性図である。

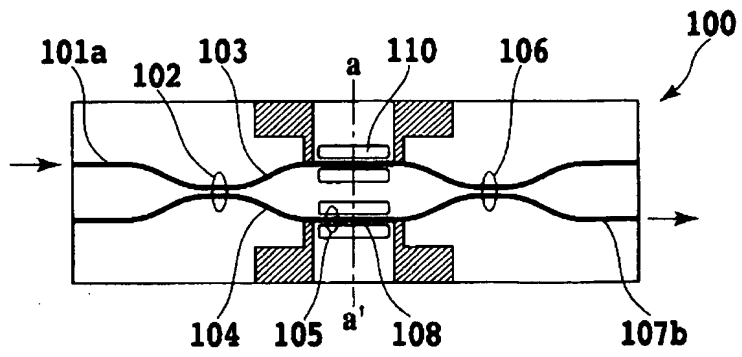
【符号の説明】

【 0 0 8 2 】

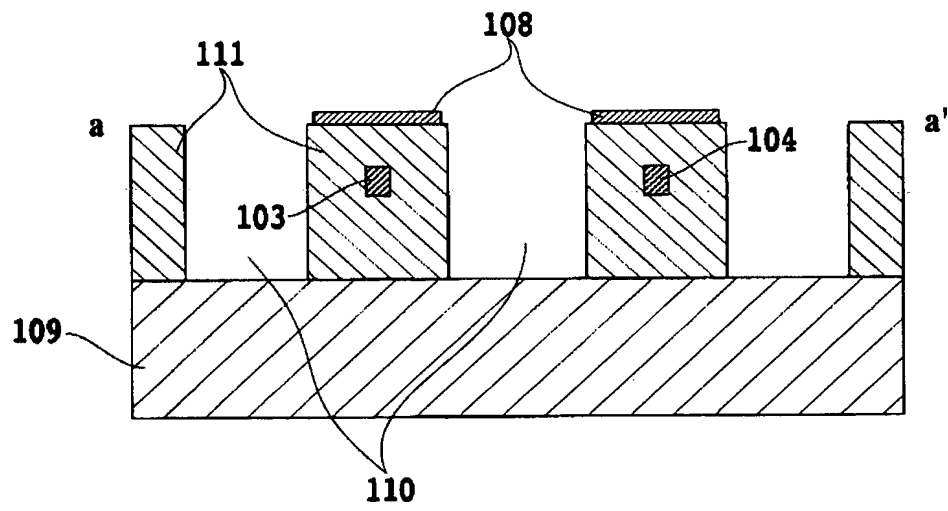
- 1 0 0 導波路型可変光減衰器
- 1 0 1 a、1 0 1 b 入力導波路
- 1 0 2 第1の光カブラ
- 1 0 3 第1のアーム導波路
- 1 0 4 第2のアーム導波路
- 1 0 5 位相制御器
- 1 0 6 第2の光カブラ
- 1 0 7 a、1 0 7 b 出力導波路
- 1 0 8 薄膜ヒータ
- 1 0 9 シリコン基板
- 1 1 0 応力解放溝
- 1 1 1 クラッド
- 3 0 1 SiO_2 下部クラッドガラス微粒子
- 3 0 2 SiO_2 - GeO_2 コアガラス微粒子
- 3 0 3 下部クラッド層
- 3 0 4 コア層
- 3 0 5 コア
- 3 0 6 SiO_2 上部クラッドガラス微粒子
- 3 0 7 上部クラッド層

【書類名】 図面

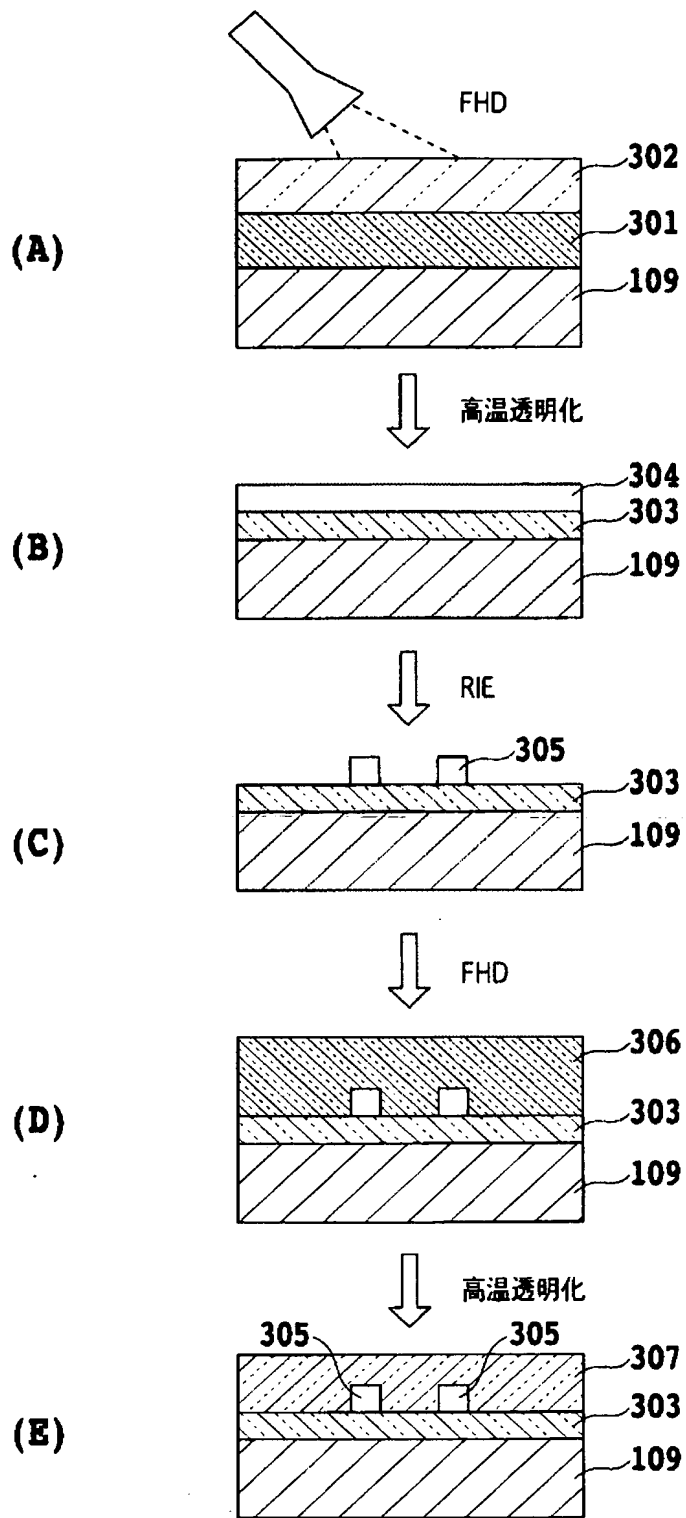
【図 1】



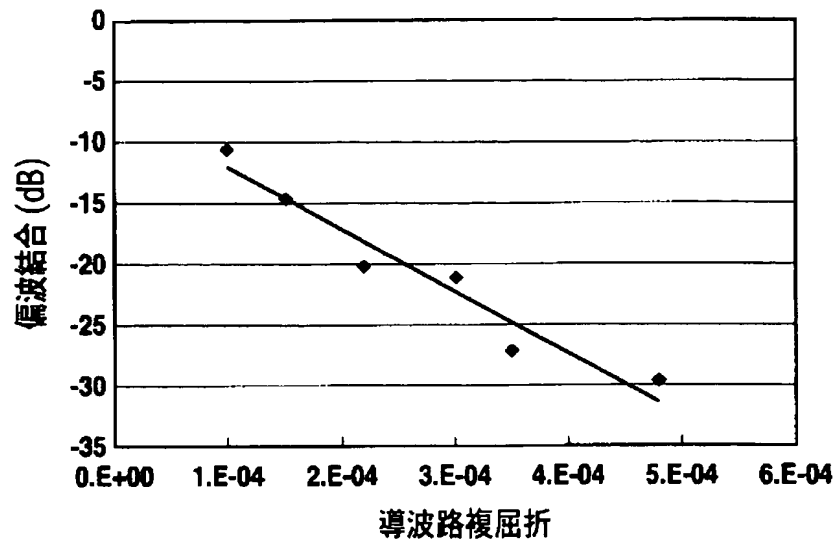
【図 2】



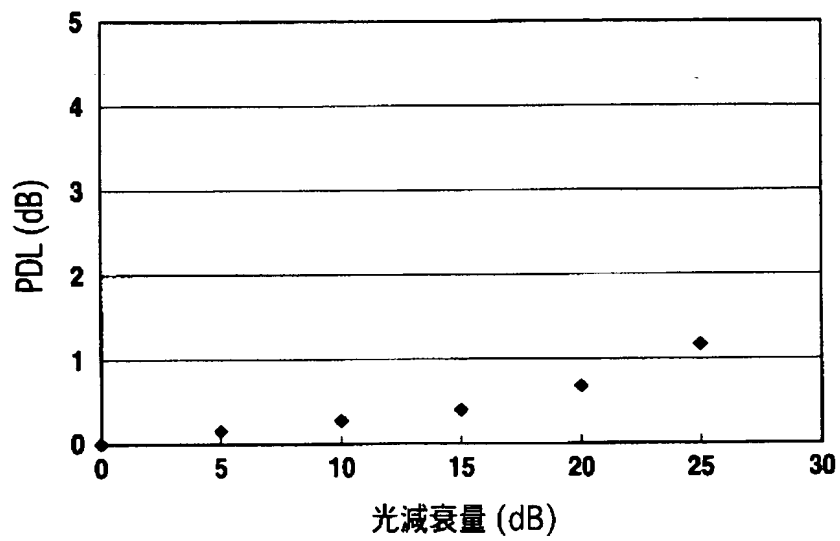
【図 3】



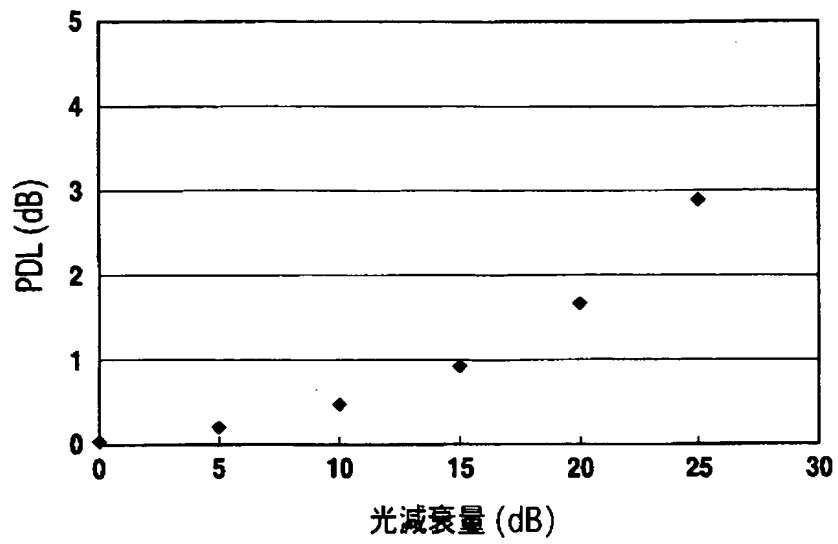
【圖 4】



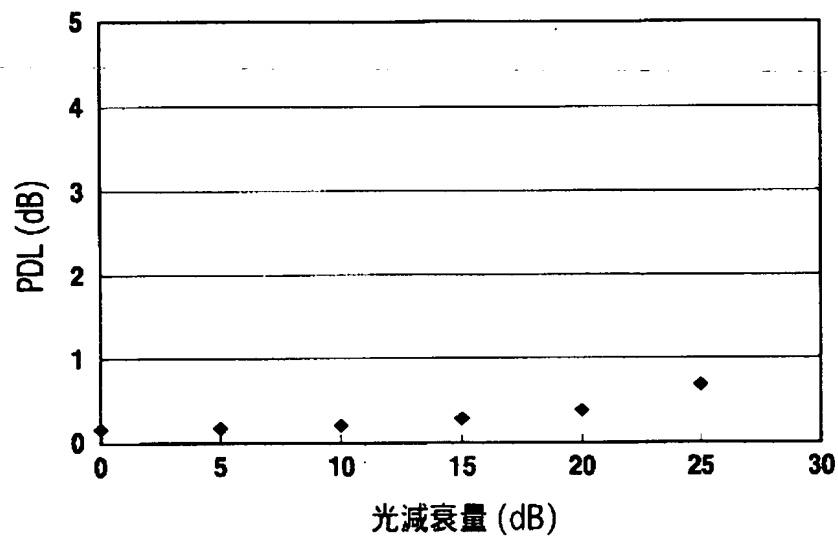
【圖 5】



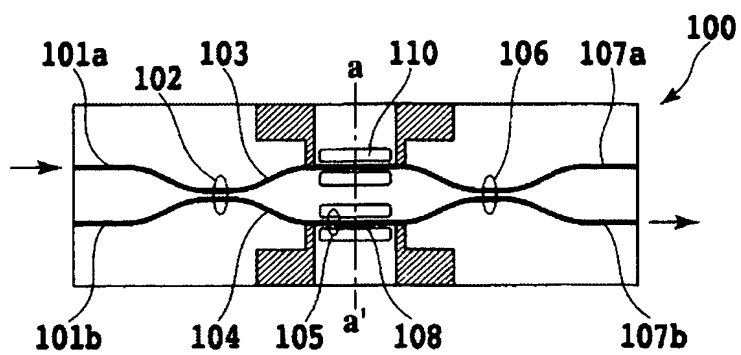
【 図 6 】



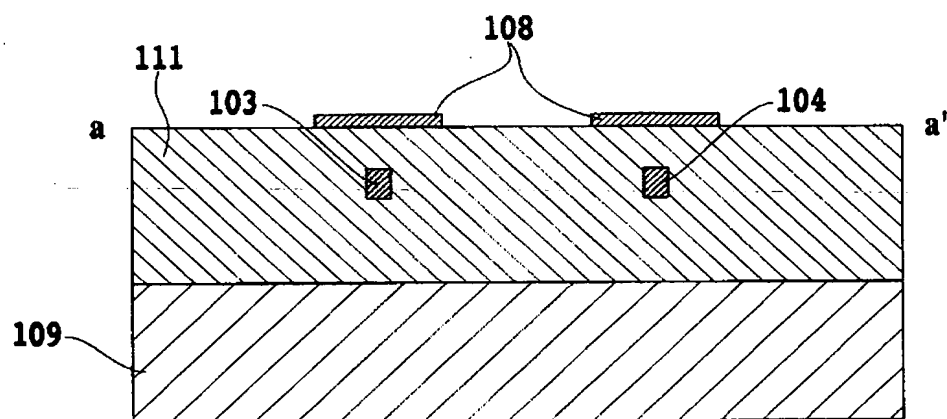
【 図 7 】



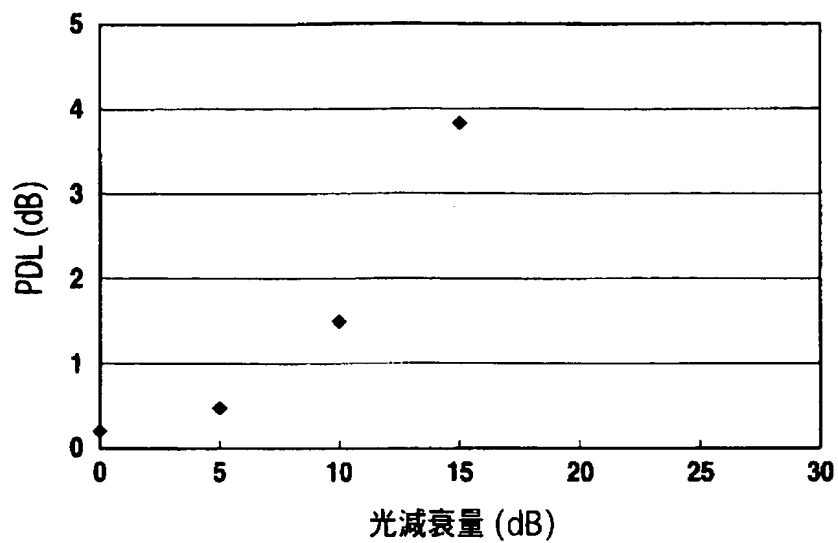
【図 8】



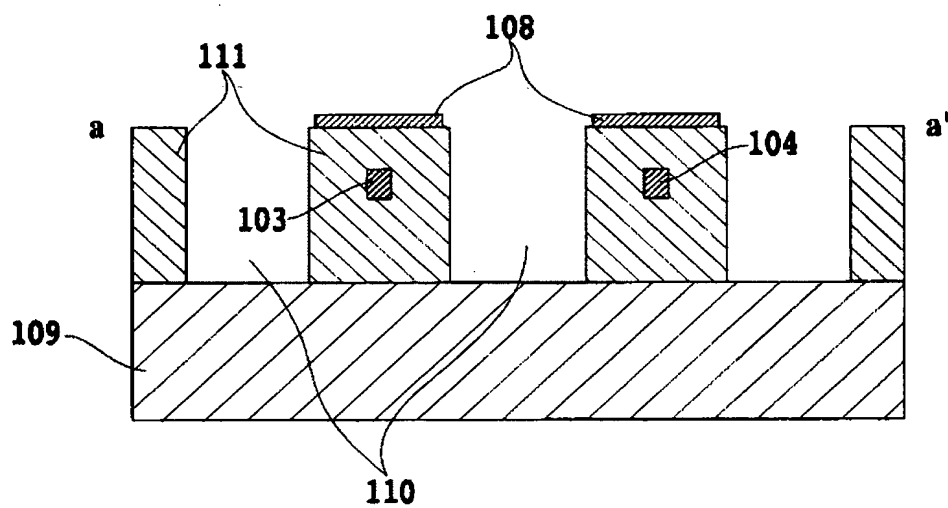
【図 9】



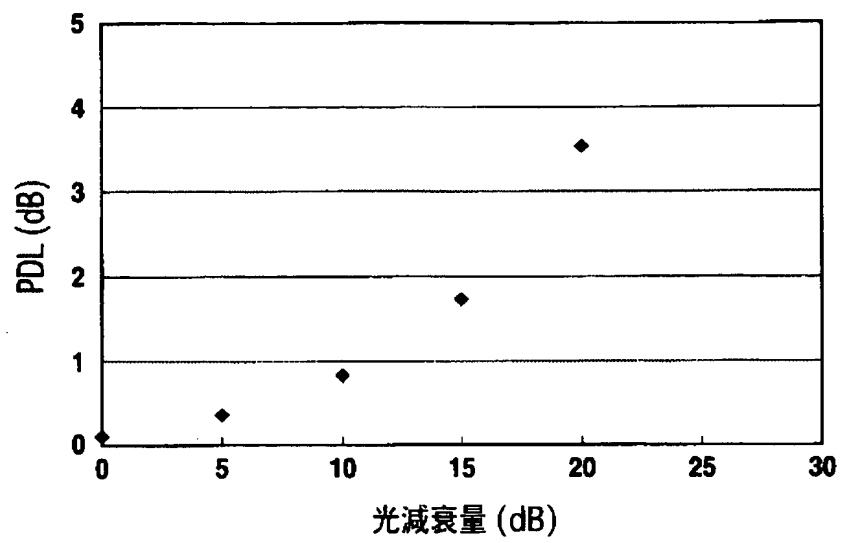
【図 10】



【図 11】



【図 1 2】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 偏波依存性の小さな導波路型可変光減衰器を提供する。

【解決手段】 第1および第2の光カプラ部での波路複屈折率（絶対値）を 3.5×10^{-4} 以上に設定することで、偏波モード結合を -25 dB 以下にして、第1および第2の光カプラでのクロスポートにおける偏波結合に起因する偏波依存性の影響を抑制する。これに加え、又は単独にアーム導波路長を使用光波長を導波路複屈折で割って求められるビート長の整数倍に設計してもよい。

【選択図】 図1

出願人履歴

0 0 0 0 0 4 2 2 6

19990715

住所変更

5 9 1 0 2 9 2 8 6

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

日本電信電話株式会社